

Нигодюк В.Е.

## МЕТОД СТАБИЛИЗАЦИИ ПРЕДПЛАМЕННОГО ПРОЦЕССА В ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ МАЛОЙ ТЯГИ

Большинство современных космических аппаратов (КА) имеют в своем составе двигательные установки (ДУ) с двухкомпонентными жидкостными двигателями, в том числе с двигателями малой тяги (ЖРД МТ), которые обеспечивают целый ряд функций, связанных с управлением движением КА.

Выхлопные струи ЖРД являются основным фактором выброса вещества в окружающее КА космическое пространство и в значительной степени обеспечивают создание внешней атмосферы КА, а также могут быть источником загрязнения наружных поверхностей КА конденсированными продуктами. Отечественные двухкомпонентные ЖРД МТ используют самовоспламеняющееся топливо (СТ) – НДМГ + АТ.

Продукты сгорания топлива современных высокоэффективных ЖРД МТ на установленных режимах работы двигателей имеют среднюю температуру торможения в пределах 2600...2800 К, скорость в выходном сечении 2400...2700 м/с и состав, практически исключая конденсацию веществ в окружающем КА пространстве и, соответственно, загрязнение поверхностей даже при попадании периферийных зон струй двигателей на элементы конструкции КА.

В тоже время известно, например [1], что при огневых наземных испытаниях ЖРД МТ на импульсных режимах в вакуумных камерах при давлениях 1...1000 Па на внутренних поверхностях камер обнаруживаются капли вязких, смолообразных продуктов, стабильных как при высотных, так и при нормальных условиях. Эти конденсированные продукты (КП) выхлопа имеют весьма низкое давление насыщенных паров ( $p_s$ ) и именно они могут выступать в качестве загрязняющих КА агентов.

Для анализа причин появления подобных КП рассмотрим основные особенности внутрикамерного рабочего процесса ЖРД МТ, следуя [2].

Ведущую роль для используемых в отечественных ЖРД МТ схемах смесеобразования играет взаимодействие компонентов СТ в жидкой фазе, которое является преобладающим

процессом в физико-химическом преобразовании топлива, начиная с момента поступления первых порций топлива в камеру сгорания (КС). В результате экзотермического химического взаимодействия компонентов, которому предшествует процесс их смешения в жидкой фазе, образуются жидкофазные промежуточные продукты (ЖФПП) и газофазные промежуточные продукты (ГФПП) - парогаз, который обеспечивает рост давления в КС в предпламенный период. Температура ЖФПП и ГФПП составляет  $T^* = 350...370$  К. Воспламенение в КС происходит в парогазе, при этом задержка самовоспламенения в отечественных ЖРЖ МТ составляет  $\tau_{zv} = 3...8$  мсек. В этот период выхлопная струя состоит как из парогаса, так и из конденсированных продуктов (ЖФПП), которые и обнаруживаются в виде жидких смолообразных капель на поверхностях вакуумных камер.

После воспламенения в КС, в период выхода двигателя на режим и на установившемся режиме, ЖФПП под действием высоких температур с большой скоростью экзотермически разлагаются и, смешиваясь и взаимодействуя с продуктами сгорания парогаса и парами компонентов, образуют высокотемпературные продукты сгорания. При останове двигателя происходит опорожнение КС от продуктов сгорания, и после падения давления ниже  $p_s$  происходит нестационарный выброс компонентов из заклапанных объемов двигателя. При этом также могут образовываться КП. Однако, учитывая количества топлив в заклапанных объемах ЖРД МТ и существенную разность в  $p_s$  компонентов, количество их при выключении ЖРД МТ существенно меньше, чем в период  $\tau_{zv}$ .

Для получения и сбора КП в количествах, достаточных для исследования их свойств, предложена и реализована методика, заключающаяся в стабилизации предпламенного взаимодействия компонентов в течение всего периода включения двигателя.

Учитывая, что воспламенение парогаса представляет собой тепловой взрыв с реакцией второго порядка, связь  $\tau_{zv}$  с давлением воспламенения  $p_v$  в КС упрощенно можно представить в виде:

$$\tau_{zv} \cdot p_v = \text{const.} \quad (1)$$

Очевидно, что для предотвращения воспламенения топлива в КС при давлении  $p_k$  необходимо выполнение в предпламенный период условия:

$$\tau_{np} \cdot p_k < \tau_{zv} \cdot p_v \quad (2)$$

где  $\tau_{np}$  – время пребывания парогаса.

Обеспечить условие (2) возможно за счет увеличения площади минимального сечения сопла двигателя, при этом уменьшается как  $\tau_{np}$ , так и  $p_k$  на установившемся режиме работы двигателя.

В экспериментах использовались серийные ЖРД МТ конструкции НИИМаш: двигатель типа 17Д51 номинальной тягой  $P_n = 110$  Н и двигатель типа 11Д456 тягой  $P_n = 103$  Н. Оба двигателя препарировались, однако обеспечивалась идентичность смесеобразования с исходными образцами за счет сохранения неизменными основных размеров КС.

Двигатель 17Д51 использовался для сбора КП с целью определения их относительной массовой доли, физико-химических и оптических свойств. Выходная часть КС с соплом была отрезана и к оставшейся части КС пристыковывалась выходная часть с соплом, имеющим диаметр критического сечения существенно больше, чем у исходного варианта.  $d_{кр} = 18; 22; 24$  мм (рис. 1).

Двигатель 11Д456 использовался для определения характера распределения КП в выхлопной струе и изучения их оптических свойств при капельной структуре. Он имел штатную камеру, включающую сверхзвуковое профилированное сопло со степенью расширения 51,3. Для обеспечения

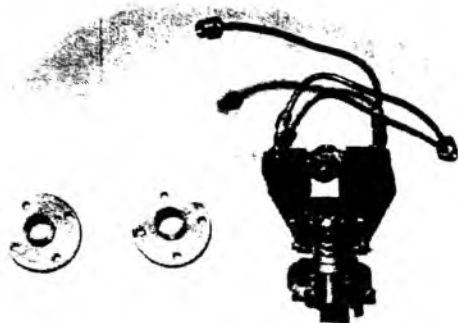


Рис. 1. Препарированный ЖРД МТ типа 17Д51 стационарного предпламенного процесса в цилиндрической части КС были сделаны два противоположно расположенных прореза размером  $20 \times 7$  мм. Вид препарированного ЖРД МТ 11Д456 на испытательном станке показан на рис. 2.

Работа выполнялась в лаборатории энергетики летательных аппаратов Самарского государственного аэрокосмического университета. Двигатели устанавливались в вакуумной камере объемом  $1 \text{ м}^3$ , включения двигателей осуществлялись при начальном давлении  $p_{жк} = 5 \dots 10$  Па. В ходе экспериментов измерялось давление  $p_{жк}$ , давление компонентов на входе в двигатель  $p_{жк}^{окг}$ , расход компонентов; количество полученных КП определялось взвешиванием.

На двигателе 17Д51 было проведено три серии экспериментов. В первой серии использовались

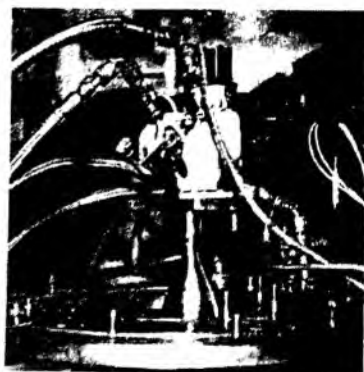


Рис. 2. Препарированный ЖРД МТ типа 11Д456

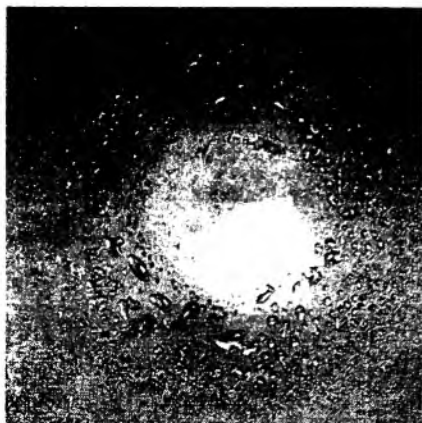


Рис. 3. Конденсированные продукты выхлопа на подложке

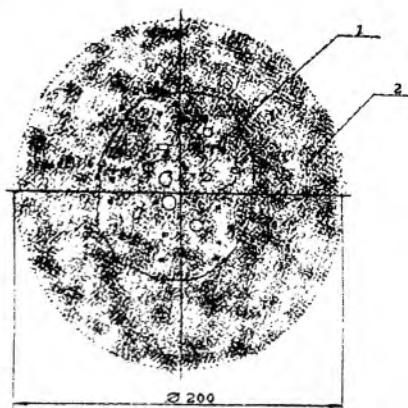


Рис. 4. Распределение конденсированных продуктов в поперечном сечении выхлопной струи ЖРД МТ типа 11Д456. 1- крупнодисперсная зона; 2- мелкодисперсная зона

съемные сопла всех размеров. Включения двигателя осуществлялось при  $p_{вк} = 1.5$  Па, продолжительность включения  $\tau_{вк} = 0.22$  сек. При  $d_{кр} = 18$  и  $22$  мм во всех включениях наблюдалось воспламенение компонентов,  $p_k$  после воспламенения в первом случае составляло  $0.21$  МПа, во втором  $0.14$  МПа. При  $d_{кр} = 24$  мм воспламенение в КС не происходило,  $p_k = 0.039$  МПа. Во второй серии исследовалось поведение КП в условиях воздушной камеры при попадании выхлопной струи на подложку. Эксперименты проводились при  $p_{вк}^{ок,г} = 0.5 \dots 1.9$  МПа. Вид конденсированных продуктов на подложке после стабилизации процесса показан на рис. 3.

В третьей серии осуществлялся сбор КП в колбы, расположенные под соплом двигателя. Было выполнено девять включений продолжительностью  $\tau_{вк} = 0.34 \dots 1.9$  с и три серии включений на импульсных режимах с  $\tau_{вк} = 0.03$  с. Общее количество полученных КП составило  $41$  г.

На двигателе 11Д456 эксперименты проводились при  $p_{вк}^{ок,г} = 1.5$  МПа. Во всех включениях воспламенение не происходило. Пример характера распределения КП в выходной струе и структуры капель, полученных с использованием двигателя 11Д456, приведен на рис. 4

Необходимо отметить, что в случае воспламенения в КС с некоторой  $\tau_{zv}$  собрать сколько-нибудь заметных количеств КП не удавалось, очевидно, из-за относительно высокой плотности выхлопной струи в ВК.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Климук П.И., Забелина И.А., Гоголев В.А. Визуальные наблюдения и загрязнение оптики в космосе. – Л.: Машиностроение, 1983.
2. Дубинкин Ю.М., Нигодюк В.Е. Проблемы организации рабочего процесса в жидкостных ракетных двигателях малой тяги. // Авиационная техника, 1993. №4.